

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ СУБМИКРОННЫХ ТУННЕЛЬНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ КОНТАКТОВ CoFeB/MgO/CoFeB С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ HSQ/PMMA

© 2024 г. И. А. Федотов<sup>а,\*</sup>, И. Ю. Пашенькин<sup>а</sup>, Е. В. Скороходов<sup>а</sup>, Н. С. Гусев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*e-mail: fedotov@ipmras.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 03.11.2023 г.

Принята к публикации 14.11.2023 г.

Отработана технология изготовления туннельных магниторезистивных (ТМР) контактов на основе слоев CoFeB/MgO/CoFeB с характерными латеральными размерами от 200 до 700 нм с использованием комбинации электронных резистов HSQ/PMMA. Для исследования процессов перемагничивания в полученных образцах были проведены измерения кривых магнетосопротивления. Показано, что в зависимости от структуры магниточувствительного слоя и геометрических параметров ТМР контактов реализуются элементы как с вихревым, так и с квазиоднородным распределением намагниченности свободного слоя. При этом в последних ширина фронта перемагничивания составляет от 2 до 6 Э.

*Ключевые слова:* туннельные магниторезистивные контакты, магнитный вихрь, магнетронное распыление, электронно-лучевая литография, ионное травление

**DOI:** 10.31857/S0015323024020032, **EDN:** YPRAZR

### ВВЕДЕНИЕ

Широкий спектр применения обуславливает необходимость в изготовлении туннельных магниторезистивных контактов (ТМК) с различными характеристиками. При использовании ТМК в датчиках магнитного поля реализация вихревого распределения намагниченности свободного слоя позволяет улучшить масштабируемость чувствительных элементов. Это связано с уменьшением взаимного влияния друг на друга отдельных сенсоров обусловленного создаваемыми ими полями рассеяния [1]. Изменение соотношения между латеральными размерами свободного и опорного ферромагнитных слоёв при сохранении вихревого состояния даёт возможность управлять чувствительностью таких датчиков [2]. С другой стороны, благодаря большим значениям относительного изменения сопротивления – 100% и более при комнатной температуре [3, 4] использование эффекта туннельного магнетосопротивления в спин-трансферных наноосцилляторах (СТНО) позволяет повысить выходную мощность единичного наногенератора [5–7]. Отдельным направлением в данной области является синхронизация больших массивов СТНО [8, 9], где также важна возможность изготовления

структур сложной формы с малыми латеральными размерами [10]. Другим требованием, предъявляемым к ТМР-контактам при их использовании в системах магниторезистивной памяти с произвольным доступом, является энергоэффективность переключения их резистивного состояния. Управление логическим состоянием ячеек хранения данных при помощи магнитоэлектрического эффекта может позволить избежать пропускания через систему токов гигантской плотности, что является характерной проблемой для наиболее распространенных методов переключения [11–17]. Как было показано в работе [18], переход между двумя резистивными состояниями потенциально возможен за счет управления межслоевым обменным взаимодействием между свободным и закрепленным слоями ТМК при приложении электрического напряжения к барьеру. Однако малая величина сдвига кривой намагничивания ( $\approx 10$  Э) накладывает жесткие требования к форме кривой перемагничивания свободного слоя, недостижимые в ТМР элементах с характерными латеральными размерами в несколько единиц микрометров, в которых ширина фронта перемагничивания составляет около 30 Э. Это обусловлено возникновением неоднородных состояний в процессе перемагничивания. Ожидается, что переход

к субмикронным латеральным размерам ТМК позволит значительно увеличить крутизну магниторезистивной кривой. Таким образом, изготовление туннельных магниторезистивных контактов с различными геометрическими параметрами является важной технологической задачей при исследовании таких систем.

В рамках данной работы обсуждаются особенности технологии изготовления ТМК на основе слоёв  $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$  с субмикронными латеральными размерами, а также влияние геометрических параметров туннельных контактов на форму кривых магнетосопротивления. Переход от оптической литографии к электронно-лучевой позволяет уменьшить латеральные размеры ТМК от нескольких единиц микрометров до нескольких сотен нанометров. Основной проблемой на этом пути стала низкая стойкость электронного резиста РММА к ионному травлению, а также его задубливание. Как следствие, последующая электрическая изоляция посредством взрывной литографии диэлектрического слоя в этой маске не представляется возможной. Проблему удалось решить путем использования двухслойной маски  $\text{HSQ}/\text{PMMA}$ , в которой  $\text{HSQ}$  имеет высокую стойкость и выполняет функцию маски для травления, а  $\text{PMMA}$  при этом сохраняет возможность растворения. Благодаря такому сочетанию свойств этих электронных резистов, данное технологическое решение позволяет формировать ТМК субмикронного латерального размера с воспроизводимыми параметрами.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Основой для изготовления ТМК послужили многослойные структуры двух типов:  $\text{Ta}(20)/\text{Pt}(10)/\text{Ta}(20)/\text{IrMn}(10)/\text{CoFeB}[001](4)/\text{MgO}[001](1.5)/\text{CoFeB}[001](2.5)/\text{Ta}(3)/\text{Pt}(10)$  и  $\text{Ta}(20)/\text{Pt}(10)/\text{Ta}(20)/\text{IrMn}(10)/\text{CoFeB}[001](4)/\text{MgO}[001](1.5)/\text{CoFeB}[001](4)/\text{CoFeB}_{\text{аморф.}}(40)/\text{Ta}(3)/\text{Pt}(10)$  (толщины указаны в нм), выращенные на подложке  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  методом магнетронного распыления при комнатной температуре. Первый тип структур используют для получения ТМК с квазиоднородным распределением намагниченности свободного слоя, а второй – для вихревого. Общая схема с указанием толщин слоёв представлена на рис. 1. Остаточное давление в напылительной камере не превышало  $5 \times 10^{-7}$  Торр, рабочее давление аргона в процессе напыления составляло  $2 \times 10^{-3}$  Торр. Барьерный слой  $\text{MgO}$  формировали радиочастотным распылением диэлектрической мишени  $\text{MgO}$  стехиометрического состава.

Формирование ТМК субмикронных латеральных размеров производили методом электронно-лучевой литографии и ионного травления в атмосфере аргона. Для формирования резистивной маски на поверхность исходной многослойной наноструктуры с помощью центрифуги последовательно наносили два типа электронных резистов –  $\text{PMMA}$  950K A2 (EM Resist Ltd., Великобритания), толщиной 200 нм и затем  $\text{HSQ}$  XR-1541-006 E-Beam (DOW CORNING™, США), толщиной 100 нм (рис. 1).

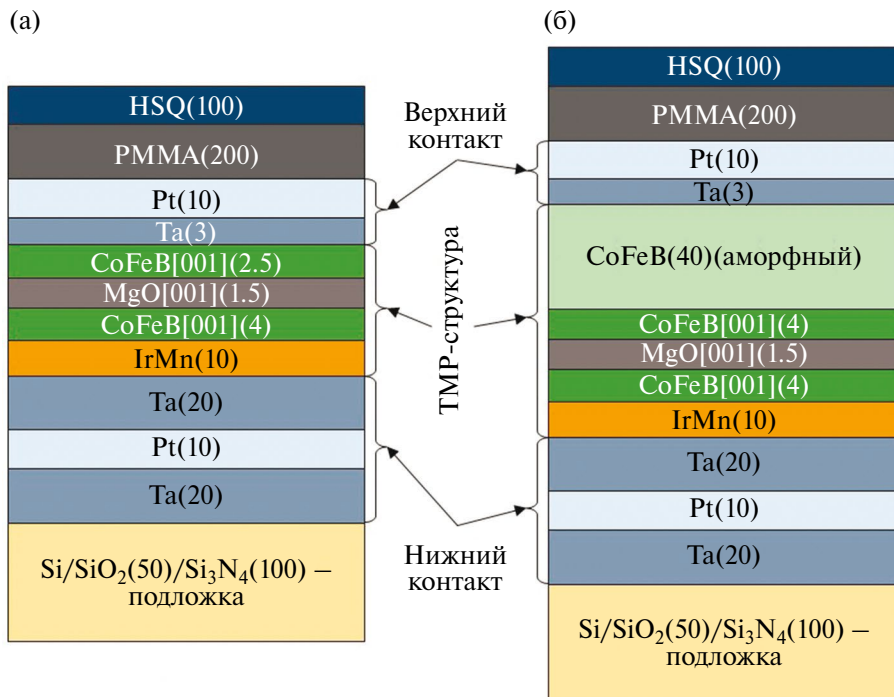


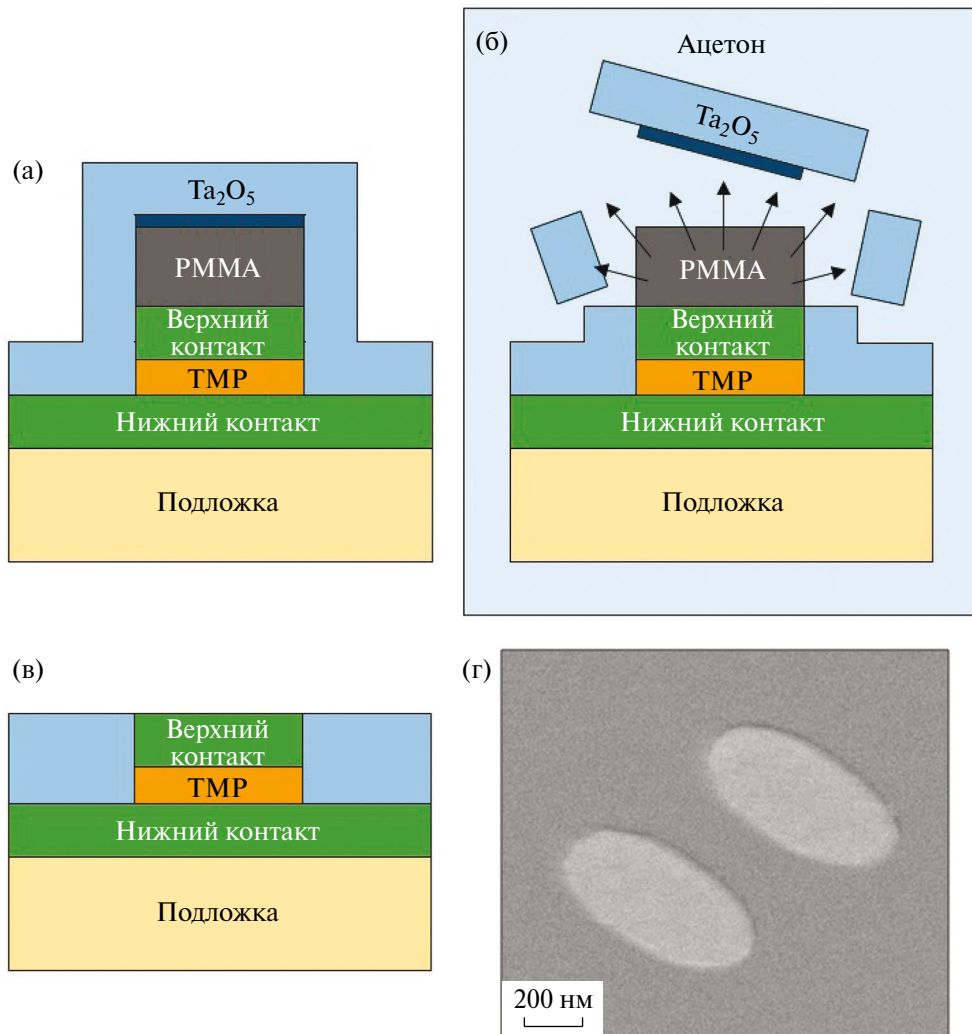
Рис. 1. Исходная многослойная наноструктура для формирования ТМР-контактов с квазиоднородным (а) и вихревым (б) распределением намагниченности свободного слоя, в скобках указаны толщины в нм.

С помощью растрового электронного микроскопа SUPRA 50 VP (Carl Zeiss, Германия) с приставкой для электронно-лучевой литографии Raith ELPHY PLUS производили экспонирование резиста HSQ путем сканирования поверхности электронным пучком. После экспонирования и проявления на поверхности образца формируется маска негативного резиста HSQ, представляющая собой частицы эллиптической формы с размерами  $200 \times 400$  нм (для ТМК с квазиоднородным распределением намагниченности) и круглые частицы диаметром 700 нм (для ТМК с вихревым распределением намагниченности). Затем производили ионное травление слоя PMMA и TMR-структуры в маске HSQ. После травления при помощи магнетронного распыления на образец наносили слой диэлектрика  $Ta_2O_5$ , чтобы сформировать электрическую изоляцию между верхним и нижним контактами (рис. 2а). Далее производится взрывная литография за счет

растворения PMMA в ацетоне при ультразвуковом воздействии (рис. 2б–г).

Использование двух электронных резистов обусловлено тем, что именно такая комбинация позволяет решить две важные задачи при изготовлении субмикронных туннельных переходов – латеральное ограничение и создание диэлектрической изоляции верхнего и нижнего контактов. Формирование резистивной маски, вообще говоря, возможно и без использования HSQ. Однако воздействие ускоренных ионов  $Ag^+$  на PMMA при травлении приводит к его “стеклованию”, вследствие чего следующий этап – создание диэлектрической изоляции контактов при помощи взрывной литографии становится невозможным. Таким образом, резист HSQ выполняет также защитную функцию слоя PMMA в процессе ионного травления.

Для исследования процессов перемагничивания в полученных образцах были проведены



**Рис. 2.** Формирование электрической изоляции путем напыления диэлектрика  $Ta_2O_5$  (а); процесс взрывной литографии (б, в); изображение TMR-контактов после электрической изоляции и вскрытия окон в диэлектрике, полученное в растровом электронном микроскопе (г).

измерения зависимости электрического сопротивления от величины внешнего магнитного поля, приложенного вдоль оси легкого намагничивания ТМК.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые магнетосопротивления ТМК эллиптической формы с квазиоднородным распределением намагниченности свободного слоя приведены на рис. 3.

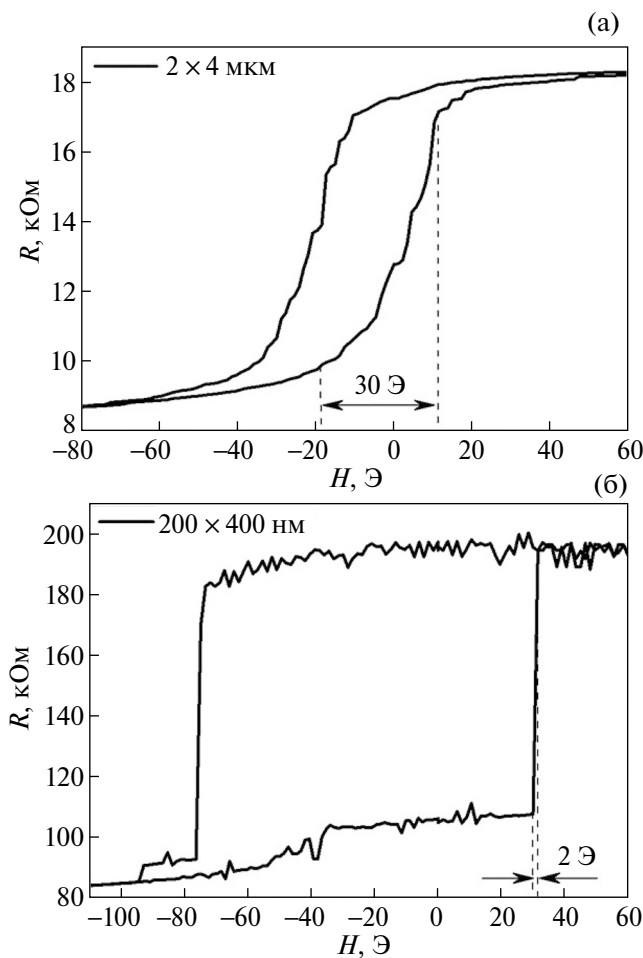
Видно, что ширина фронта перемагничивания ТМК с латеральными размерами  $2 \times 4$  мкм составляет около 30 Э. Уменьшение латерального размера частицы до  $200 \times 400$  нм позволила снизить эту величину до 2–6 Э. В таких ТМК реализуются два устойчивых однодоменных состояния, переключение между которыми происходит путем когерентного вращения намагниченности.

На рис. 4 представлены кривые магнетосопротивления цепочки из 5 последовательно со-

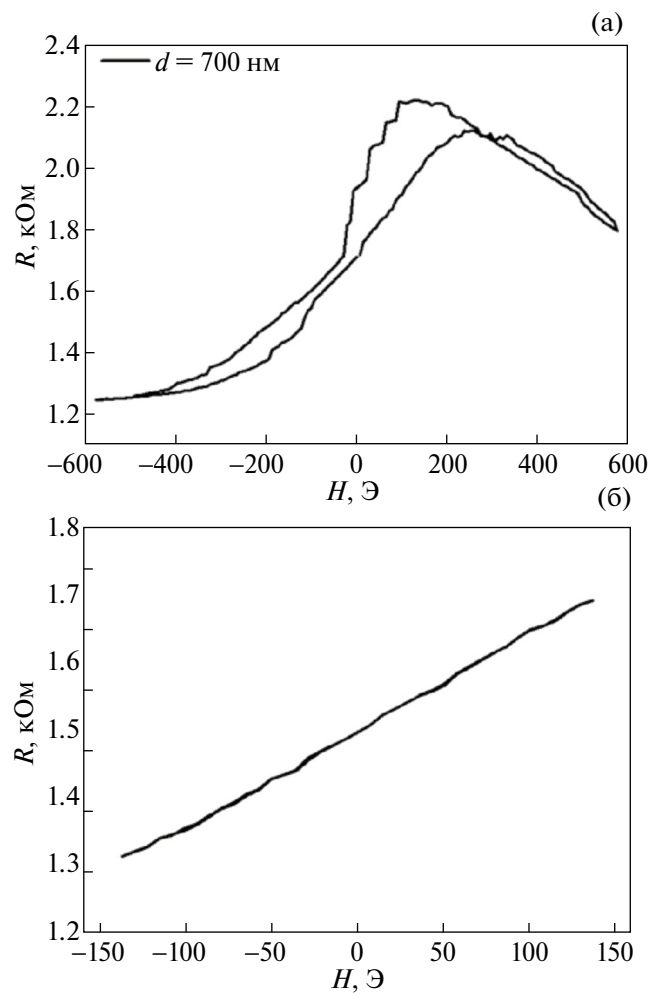
единенных круглых ТМР-контактов диаметром около 700 нм, полученные в разных диапазонах изменения внешнего магнитного поля. Соединение ТМК в цепочку было необходимо для предупреждения статического пробоя барьера ввиду его малой толщины и, соответственно, низкого сопротивления. Форма кривой магнетосопротивления свидетельствует о вихревом распределении намагниченности свободного слоя ТМК (рис. 4а) [1]. Еще одним подтверждением этого является безгистерезисная и линейная зависимость  $R(H)$  в диапазоне полей от  $-150$  Э до  $150$  Э (рис. 4б).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, отработана технология изготовления туннельных магниторезистивных контактов с характерными латеральными размерами от 200 до 700 нм. В зависимости от структуры магниточувствительного слоя, а также геометрической формы реализованы ТМР-элементы



**Рис. 3.** Участки кривых магнетосопротивления, отвечающие процессу перемагничивания квазиоднородного свободного ферромагнитного слоя для одиночного ТМР-контакта с латеральными размерами: а)  $2 \times 4$  мкм; б)  $200 \times 400$  нм.



**Рис. 4.** Кривые магнетосопротивления цепочки из 5 круглых ТМР-контакта с диаметром около 700 нм и вихревым распределением намагниченности свободного слоя.

с вихревым или квазиоднородным распределением намагниченности свободного слоя. Переход к субмикронным латеральным размерам позволяет получать ТМК, обладающие резким фронтом перемагничивания ( $\approx 2$  Э). Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергоэффективной магниторезистивной памяти и датчиков магнитного поля.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема ГЗ: FFUF–2022–0006).

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. He G., Zhang Y. and Xiao G. Nonhysteretic Vortex Magnetic Tunnel Junction Sensor with High Dynamic Reserve // *Phys. Rev. Applied*. 2020. V. 14. P. 034051.
2. Endo M., Al-Mahdawi M., Oogane M. and Ando Y. Control of sensitivity in vortex-type magnetic tunnel junction magnetometer sensors by the pinned layer geometry // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. V. 55. P. 195001.
3. Yuasa S. and Djayaprawira D. Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO (001) barrier. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 337.
4. Yuasa S., Nagahama T., Fukushima A., Suzuki Y. and Ando K. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions // *Nature Mater.* 2004. V. 3. P. 868.
5. Lehdorff R., Bürgler D.E., Gliga S., Hertel R., Grünberg P., Schneider C.M., Celinski Z. Magnetization dynamics in spin torque nano-oscillators: Vortex state versus uniform state // *Phys. Rev. B*. 2009. V. 80. P. 054412.
6. Dussaux A., Georges B., Grollier J., Cros V., Khvalkovskiy A.V., Fukushima A., Konoto M., Kubota H., Yakushiji K., Yuasa S., Zvezdin K.A., Ando K., Fert A. Large microwave generation from current-driven magnetic vortex oscillators in magnetic tunnel junctions // *Nature Commun.* 2010. V. 1. P. 1.
7. Devolder T., Bianchini L., Joo-Von Kim, Crozat P., Chappert C., Cornelissen S., Op de Beeck M., Lagae L. Auto-oscillation and narrow spectral lines in spin-torque oscillators based on MgO magnetic tunnel junctions // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 106. P. 103921.
8. Миронов В.Л., Татарский Д.А., Фраерман А.А. Синхронизация автоколебаний обменно-связанных магнитных вихрей // *ФММ*. 2022. Т. 64. С. 1328–1332.
9. Locatelli N., Hamadeh A., Abreu Araujo F., Belanovsky A.D., Skirdkov P.N., Lebrun R., Naletov V.V., Zvezdin K.A., Munoz M., Grollier J., Klein O., Cros V. and De Loubens G. // Efficient Synchronization of Dipolarly Coupled Vortex-Based Spin Transfer Nano-Oscillators // *Sci Rep*. 2015. V. 5. P. 17039.
10. Скороходов Е.В., Татарский Д.А., Горев П.В., Миронов В.Л., Фраерман А.А. Гиротропные колебания магнитных вихрей в двух взаимодействующих ферромагнитных дисках // *Письма в ЖЭТФ*. 2023. Т. 117. С. 165–170.
11. Andre T.W., Nahas J.J., Subramanian C.K., Garni B.J., Lin H.S., Omair A. and Martino W.L. A 4-Mb 0.18- $\mu\text{m}$  1T1MTJ toggle MRAM with balanced three input sensing scheme and locally mirrored unidirectional write drivers // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2005. V. 40. P. 301–309.
12. Engel B.N., Akerman J., Butcher B., Dave R.W., DeHerrera M., Durlam M., Grynkewich G., Janesky J., Pietambaram S.V., Rizzo N.D., Slaughter J.M., Smith K., Sun J.J. and Tehrani S. A 4-Mb toggle MRAM based on a novel bit and switching method // *IEEE Trans. Magn.* 2005. V. 41. P. 132.
13. Oh S.C., Park S.Y., Manchon A. et al. Bias-voltage dependence of perpendicular spin-transfer torque in asymmetric MgO-based magnetic tunnel junctions // *Nature Phys.* 2009. V. 5. P. 898–902.
14. Sankey J.C., Cui Y.T., Sun J.Z., Slonczewski J.C., Buhrman R.A. and Ralph D.C. Measurement of the spin-transfer-torque vector in magnetic tunnel junctions // *Nature Phys.* 2007. V. 4. P. 67–71.
15. Alzate J.G., Amiri P.Kh., Upadhyaya P., Cherepov S.S., Zhu J., Lewis M., Dorrance R., Katine J.A., Langer J., Galatsis K., Markovic D., Krivorotov I. and Wang K.L. Voltage-induced switching of nanoscale magnetic tunnel junctions. // *IEEE International Electron Devices Meeting*. 2012. P. 29.5.1. – 29.5.4.
16. Alzate J.G., Amiri P.Kh., Yu G., Upadhyaya P., Katine J.A., Langer J., Ocker B., Krivorotov I.N. and Wang K.L. Temperature dependence of the voltage-controlled perpendicular anisotropy in nanoscale MgO|CoFeB|Ta magnetic tunnel junctions // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 104. P. 112410.
17. Wang W.G., Li M., Hageman S. and Chien. C.L. Electric-field-assisted switching in magnetic tunnel junctions // *Nature Mater.* 2012. V. 11. P. 64–68.
18. Пашенькин И.Ю., Сапожников М.В., Гусев Н.С., Рогов В.В., Татарский Д.А., Фраерман А.А., Волочаев М.Н. Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах CoFeB/MgO/CoFeB // *Письма в ЖЭТФ*. 2020. Т. 111. С. 815–818.

## FABRICATION OF SUBMICRON CoFeB/MgO/CoFeB MAGNETIC TUNNEL JUNCTION USING A RESISTIVE MASK HSQ/PMMA

I. A. Fedotov<sup>1, \*</sup>, I. Yu. Pashen'kin<sup>1</sup>, E. V. Skorokhodov<sup>1</sup>, N. S. Gusev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*\*e-mail: fedotov@ipmras.ru*

The technology of manufacturing magnetic tunnel junctions based on CoFeB/MgO/CoFeB layers with characteristic lateral dimensions from 200 to 700 nm using a combination of HSQ/PMMA electronic resistors has been developed. To study the processes of magnetization reversal in the obtained samples, measurements of magnetoresistance curves were carried out. It is shown that, depending on the structure of the magnetically sensitive layer and the geometric parameters of the TMR contacts, elements with both vortex and quasi-homogeneous distribution of the magnetization of the free layer are realized. At the same time, in the latter, the width of the magnetization reversal front is from 2 to 6 Oe.

*Keywords:* Magnetic tunnel junction, magnetic vortex, magnetron sputtering, electron beam lithography, ion etching